

# MẤT ỔN ĐỊNH CỦA CỘT THỎI PHÒNG ĐƯỢC CẤU TẠO TỪ MÀNG MỎNG TRỰC GIAO CÓ ĐỊNH HƯỚNG BẤT KỲ

## BUCKLING OF AN INFLATED ORTHOTROPIC MEMBRANE COLUMN WITH AN ARBITRARILY ORIENTED ORTHOTROPY BASIS

Nguyễn Quang Tùng\*

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng<sup>1</sup>

\*Tác giả liên hệ: nqtung@dut.udn.vn

(Nhận bài: 23/3/2022; Chấp nhận đăng: 04/5/2022)

**Tóm tắt** - Bài báo này nghiên cứu sự mất ổn định của cột màng mỏng thổi phòng được cấu tạo từ màng mỏng trực giao mà phương trực giao được định hướng bất kỳ. Kết thúc giai đoạn thổi phòng, ứng xử của vật liệu thay đổi, phụ thuộc vào sự biến dạng kết cấu và định hướng vật liệu. Lý thuyết kết cấu màng mỏng thổi phòng được tóm tắt, kể đến sự biến dạng của cột và sự thay đổi ứng xử vật liệu. Các phương trình sau đó được biến đổi để thu được một phương trình bậc hai theo lực nén dọc trục. Giải phương trình này cho phép thu được lực dọc trục tối hạn của bài toán mất ổn định cột màng mỏng thổi phòng chịu nén. Ảnh hưởng của định hướng vật liệu đến sự thay đổi của ứng xử vật liệu và đến sự biến thiên lực dọc trục tối hạn đã được phân tích. Mô phỏng số cho thấy kết quả giải tích và kết quả thu được từ mô hình phần tử hữu hạn là khá trùng khớp.

**Từ khóa** - Cột thổi phòng; mất ổn định; lực tối hạn; màng trực giao; định hướng bất kỳ.

### 1. Giới thiệu chung

Kết cấu màng mỏng thổi phòng đã và đang được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong thực tế. Ưu điểm nổi bật của loại kết cấu này là trọng lượng bản thân nhẹ, có khả năng tạo hình đa dạng và màu sắc phong phú. Bên cạnh đó, loại kết cấu này có giá thành chế tạo rẻ, vận chuyển và lắp ráp nhanh chóng, tiện lợi nên nó thường xuyên được sử dụng trong các sự kiện tạm thời.



Hình 1. Kết cấu màng mỏng thổi phòng

Đã có nhiều nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm về ứng xử của kết cấu màng mỏng thổi phòng. Các nghiên cứu được thực hiện theo hai giai đoạn của kết cấu màng mỏng thổi phòng: Giai đoạn thổi phòng và giai đoạn chịu lực.

Sự thổi phòng của ống màng mỏng đã được nhiều nhóm nghiên cứu thực hiện, điển hình có thể kể đến nghiên cứu của Thomas và Levan [1]. Nhóm tác giả xét ống có thành dày, biến dạng lớn, sau đó chấp nhận giả thiết ống

**Abstract** - This paper studies the buckling of the inflatable column made of an orthotropic membrane, with the orthotropy directions oriented at an arbitrary angle. At the end of the inflation stage, the material behavior changed, depending on the deformation of the column and material orientation. The theory of inflated structure is summarized, considering the deformation of the column and the change of material behavior. This was then reformulated to a quadratic equation of axial force, which can be easily solved to get the critical force of the column. The influences of the material orientation on the change of material behavior and on the variation of critical force of the column were analyzed. The numerical results were confirmed with those of a 3D thin-shell finite element model.

**Key words** - Inflatable column; buckling; critical force; orthotropic membrane; arbitrarily orientation.

thành mỏng để kể đến các ứng suất và biến dạng xuất hiện trong thành ống. Một phương trình bậc 3 theo biến dạng của ống đã được đề xuất, cho phép xác định được biến dạng của ống ở trạng thái thổi phòng. Nghiên cứu này được giới hạn trong trường hợp phương trực giao của vật liệu được định hướng trùng với trục ống. Để phát triển lý thuyết của Thomas và Levan, nhóm nghiên cứu Nguyễn và cộng sự [2] đã khái quát hoá bài toán thổi phòng ống màng mỏng trực giao trong trường hợp phương trực giao được định hướng bất kỳ, không nhất thiết phải song song với trục ống. Nhóm đã đề xuất được hệ 3 phương trình phi tuyến, cho phép xác định được biến dạng và góc xoay của tiết diện ở trạng thái thổi phòng. Nguyễn và Le [3] sau đó đã thực hiện thí nghiệm ống màng mỏng thổi phòng để kiểm chứng lý thuyết, cũng như thực hiện bài toán ngược để xác định các hệ số đàn hồi của vật liệu từ các phép đo biến dạng ống thổi phòng.

Các nghiên cứu về ứng xử của kết cấu thổi phòng trong giai đoạn chịu lực cũng đã được thực hiện. Điển hình có thể kể đến nghiên cứu của Comer và Levy [4], theo đó, nhóm tác giả đã xây dựng mô hình ống tuân theo quy luật vận động cổ điển của Euler-Bernoulli và vật liệu là đẳng hướng và đàn hồi tuyến tính.

Fichter [5] đã phát triển một lý thuyết tính toán ống màng mỏng thổi phòng dựa trên việc cực tiểu hóa thế năng toàn phần để rút ra một hệ phương trình giải tích cho bài toán uốn phẳng ống màng mỏng thổi phòng. Levan và Wielgosz [6] đã cải tiến lý thuyết tính toán của Fichter bằng

<sup>1</sup> The University of Danang - University of Science and Technology (Nguyen Quang Tung)

cách phát triển các công thức trong hệ quy chiếu Lagrange trên cơ sở cân bằng công ảo, kể đến biên dạng lớn và góc xoay của tiết diện đến ứng xử của dầm màng mỏng thời phỏng. Tuy nhiên, phạm vi nghiên cứu của nhóm vẫn là vật liệu đồng chất và đẳng hướng.

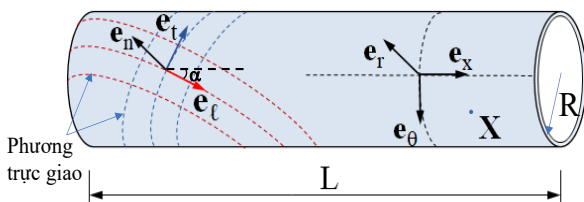
Nguyen và cộng sự [7]; Apedo và cộng sự [8]; Nguyen và cộng sự [9] đã mở rộng nghiên cứu của Levan và Wielgosz đối với vật liệu trực giao. Các bài toán uốn ngang và uốn dọc của dầm màng mỏng đã được thực hiện, tuy nhiên vẫn hạn chế trong khuôn khổ phương trực giao được định hướng dọc theo trục dầm. Chưa có nhiều nghiên cứu về ứng xử của kết cấu màng mỏng trực giao mà phương trực giao được định hướng bất kỳ.

Trong bài báo này, ứng xử của cột màng mỏng trực giao có phương định hướng vật liệu là bất kỳ được nghiên cứu. Kết thúc giai đoạn thời phỏng, không những kích thước của cột thay đổi mà ứng xử của vật liệu cũng có sự thay đổi lớn, đặc biệt khi định hướng vật liệu không nhất thiết phải song song với trục kết cấu. Quan hệ giữa hệ số vật liệu ở trạng thái tự nhiên và trạng thái biến dạng được kể đến trong nghiên cứu ứng xử tổng thể của kết cấu. Giải hệ phương trình cân bằng cho phép xác định được lực dọc tới hạn trong bài toán uốn dọc cột màng mỏng trực giao thời phỏng. Các kết quả mô phỏng số được so sánh với kết quả thu được từ mô hình phân tử hữu hạn để kiểm chứng sự đúng đắn của lý thuyết được đề ra.

## 2. Ứng xử của cột màng mỏng thời phỏng

### 2.1. Kích thước hình học của cột ở trạng thái thời phỏng

Lý thuyết về sự thời phỏng của cột màng mỏng đã được nhóm nghiên cứu Nguyen và cộng sự [2] thực hiện. Theo đó, cột màng mỏng bị thời phỏng bởi áp suất  $p$ . Ở trạng thái tự nhiên, cột có bán kính  $R$  và chiều dài  $L$ . Góc tạo bởi các định hướng dọc của màng mỏng và trục cột được gọi là góc định hướng và ký hiệu là  $\alpha$ , (xem Hình 2).



Hình 2. Cấu tạo của cột

Ở trạng thái thời phỏng, cột có bán kính  $r = k_\theta R$  và chiều dài  $l = k_x L$ . Trong đó,  $k_\theta, k_x$  lần lượt là các hệ số biểu hiện sự thay đổi bán kính và chiều dài của cột ở trạng thái thời phỏng.

Các hệ số này được giải từ hệ phương trình phi tuyến ba ẩn thu được từ việc phát triển hệ vận động của cột màng mỏng khi chịu áp suất thời phỏng [2]:

$$\begin{aligned} k_\theta^2 - 1 &= \frac{pR}{k_x} [C_{\theta\theta\theta\theta}(R^2 k_\theta^2 k_\beta^2 + 2k_x^2) + C_{\theta\theta\alpha\alpha} k_\theta^2 - C_{\theta\alpha\alpha\theta} R k_\theta^2 k_\beta] \\ k_x^2 + R^2 k_\theta^2 k_\beta^2 - 1 &= \frac{pR}{k_x} [C_{\alpha\alpha\theta\theta}(R^2 k_\theta^2 k_\beta^2 + 2k_x^2) + C_{\alpha\alpha\alpha\alpha} k_\theta^2 - C_{\alpha\alpha\alpha\theta} R k_\theta^2 k_\beta] \\ 2R k_\theta^2 k_\beta &= \frac{pR}{k_x} [C_{\theta\alpha\theta\alpha}(R^2 k_\theta^2 k_\beta^2 + 2k_x^2) + C_{\theta\alpha\alpha\alpha} k_\theta^2 - C_{\theta\alpha\alpha\theta} R k_\theta^2 k_\beta] \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó,  $C_{\dots}$  là các hệ số mô đun độ mềm của vật liệu, được tính toán từ các giá trị mô đun đàn hồi  $E_t H$ ,  $E_t H$  theo hai phương trực giao và mô đun chống cắt  $G_{tt} H$  của vật liệu.

### 2.2. Ứng xử của vật liệu ở trạng thái thời phỏng

Ở trạng thái thời phỏng, hệ số đàn hồi của vật liệu sẽ thay đổi tùy theo trạng thái biến dạng của kết cấu. Quan hệ giữa các hệ số đàn hồi của vật liệu ở trạng thái thời phỏng – được chú thích là “inf” và hệ số đàn hồi của vật liệu ở trạng thái tự nhiên được viết như sau:

$$\begin{aligned} (E_t H)_{\text{inf}} &= \frac{k_x^3}{k_\theta} E_t H \\ (E_t H)_{\text{inf}} &= \frac{k_x^3}{k_\theta} E_t H \\ (G_{tt} H)_{\text{inf}} &= k_x k_\theta G_{tt} H \end{aligned} \quad (2)$$

Các giá trị mô đun vật liệu này được tính toán trong hệ quy chiếu trực giao  $(e_n, e_t, e_r)$  của vật liệu. Trong mục tiếp theo, bài toán uốn dọc của cột sẽ được thiết lập với hệ tọa độ trụ  $(e_r, e_\theta, e_x)$  của cột. Do đó, cần tính được các giá trị mô đun vật liệu  $E_x H$  và  $G_{\theta x} H$  trong hệ tọa độ này.

Theo như minh họa trong Hình 2, hai vec-tơ pháp tuyến  $e_n$  và  $e_r$  là trùng nhau. Vec-tơ  $e_t$  hợp với vec-tơ  $e_x$  một góc  $\alpha$ . Quan hệ giữa các vec-tơ chi phương của hai hệ trục tọa độ này được viết như sau:

$$\begin{aligned} e_r &= e_n \\ e_\theta &= -\sin \alpha \times e_t - \cos \alpha \times e_r \\ e_x &= \cos \alpha \times e_t - \sin \alpha \times e_r \end{aligned} \quad (3)$$

Áp dụng quan hệ (3) vào công thức chuyển trục, ta được phương trình (4) như bên dưới:

$$\begin{aligned} E_x H &= \frac{1}{\frac{1}{(E_t H)_{\text{inf}}} c^4 + \frac{1}{(E_r H)_{\text{inf}}} s^4 + \left[ \frac{v_{tt}}{(G_{tt} H)_{\text{inf}}} + 2 \frac{v_{tr}}{(E_t H)_{\text{inf}}} \right] c^2 s^2} \\ G_{\theta x} H &= \frac{v_{tr}}{4 \left( \frac{1}{(E_t H)_{\text{inf}}} + \frac{1}{(E_r H)_{\text{inf}}} - 2 \frac{v_{tr}}{(E_t H)_{\text{inf}}} \right) s^2 c^2 + \frac{v_{tr}}{(G_{tt} H)_{\text{inf}}} (c^2 - s^2)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

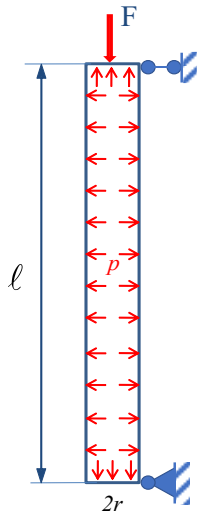
Trong đó,  $s = \sin \alpha$ ;  $c = \cos \alpha$ . Các giá trị mô-đun vật liệu  $E_x H$  và  $G_{\theta x} H$  này phụ thuộc vào góc định hướng  $\alpha$  của vật liệu, biến thiên kích thước hình học của cột  $(k_x, k_\theta)$  và sẽ được phân tích ở mục sau.

### 2.3. Mất ổn định của cột màng mỏng thời phỏng

Xét cột màng mỏng được liên kết khớp hai đầu, có bán kính  $r = k_\theta R$ , chiều dài  $l = k_x L$ , chịu áp suất thời phỏng  $p$  và chịu lực nén dọc trục  $F$ .

Áp dụng quy luật ứng xử của vật liệu vào hệ phương trình cân bằng của Nguyen và cộng sự [7], ta được hệ phương trình cân bằng tuyến tính như bên dưới:

$$\begin{aligned} -N_{0,x} &= 0 \\ -(N_0 + kG_{\theta x} S_0) V_{,x}^2 + (P + kG_{\theta x} S_0) \theta_{,x} &= 0 \\ -(E_x + \frac{N_0}{S_0}) I_0 \theta_{,x}^2 - (P + kG_{\theta x} S_0) (V_{,x} - \theta) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$



**Hình 3.** Cột mỏng thẳng đứng chịu uốn dọc

Phát triển hệ phương trình (5) với các điều kiện biên tương ứng, suy ra được phương trình bậc 2 theo lực dọc  $F$ :

$$F^2 \frac{\Omega^2 I_0}{S_0} - F \left[ \Omega^2 \left( E_x + \frac{P}{S_0} \right) I_0 + (P + kG_{\theta_x} S_0) \left( 1 + \frac{\Omega^2 I_0}{S_0} \right) \right] + \Omega^2 \left( E_x + \frac{P}{S_0} \right) I_0 (P + kG_{\theta_x} S_0) = 0 \quad \left( \Omega = \frac{n\pi}{L} \right) \quad (6)$$

Nếu ký hiệu:

$$A = \frac{\Omega^2 I_0}{S_0}$$

$$B = - \left[ \Omega^2 \left( E_x + \frac{P}{S_0} \right) I_0 + (P + kG_{\theta_x} S_0) \left( 1 + \frac{\Omega^2 I_0}{S_0} \right) \right]$$

$$C = \Omega^2 \left( E_x + \frac{P}{S_0} \right) I_0 (P + kG_{\theta_x} S_0)$$

Lực dọc tới hạn sẽ được tính theo công thức:

$$F_{cr} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (7)$$

#### 2.4. Mô phỏng số

Ứng xử của cột mỏng thẳng đứng sẽ được nghiên cứu thông qua một vài phép mô phỏng số. Cột có bán kính  $R=0,1m$ , dài  $L=2,5m$ , được cấu tạo từ ba loại vật liệu mỏng thẳng giao khác nhau. Các hệ số đàn hồi của vật liệu mỏng thẳng được cho trong Bảng 1.

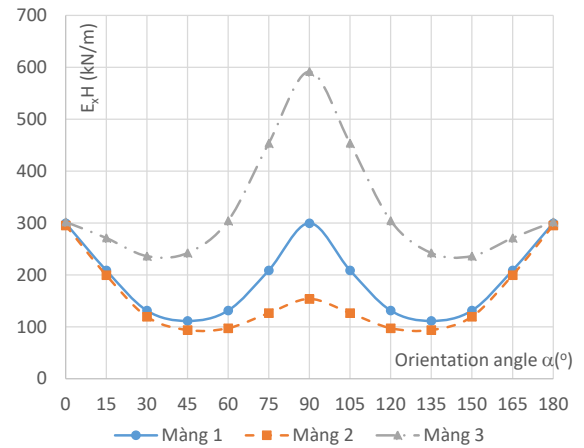
**Bảng 1.** Hệ số đàn hồi của vật liệu mỏng thẳng

	Màng 1	Màng 2	Màng 3
$E_t H$ (kN/m)	300	300	300
$E_r H$ (kN/m)	300	150	600
$G_{\theta_t} H$ (kN/m)	9,5	7,5	12,5
$\nu_{\theta_t}$	0,25	0,22	0,12

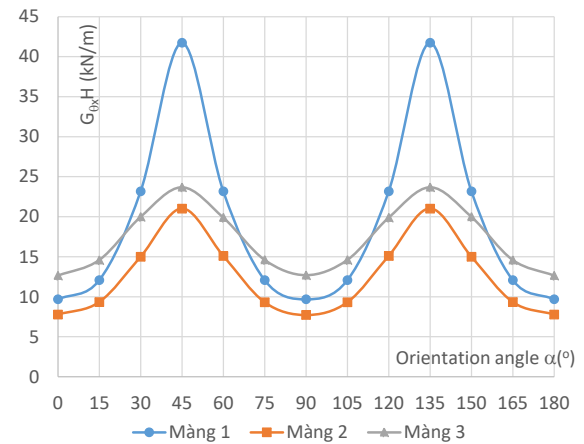
Đối với mỗi loại vật liệu, xét 7 góc định hướng  $\alpha$  khác nhau: từ  $0^0$  cho đến  $180^0$  với số gia  $15^0$ . Áp suất thổi phồng  $p=50$  kPa.

#### 2.4.1. Ảnh hưởng của định hướng vật liệu đến hệ số đàn hồi của vật liệu trong hệ tọa độ trụ

Sự biến thiên của các hệ số này được thể hiện trong Hình 4 và Hình 5:



**Hình 4.**  $E_x H$  vs  $\alpha$



**Hình 5.**  $G_{\theta_x} H$  vs  $\alpha$

Đối với vật liệu cân bằng như Màng 1 ( $E_r H = E_t H$ ), giá trị  $E_x H$  sẽ đạt giá trị lớn nhất khi trục trục giao của vật liệu trùng với trục cột ( $\alpha = 0^0, 90^0, 180^0$ ) và sẽ đạt giá trị bé nhất ở góc định hướng  $\alpha = 45^0, 135^0$ .

Đối với vật liệu không cân bằng như Màng 2 và Màng 3 ( $E_r H \neq E_t H$ ), tùy thuộc  $E_r H > E_t H$  hay ngược lại mà  $E_x H$  sẽ đạt giá trị lớn nhất ở  $\alpha = 0^0$  hay  $\alpha = 90^0$ .  $E_x H$  sẽ đạt giá trị bé nhất ở định hướng  $\alpha = 45^0 - 50^0$ .

$G_{\theta_x} H$  luôn đạt giá trị lớn nhất ở góc định hướng  $\alpha = 45^0, 135^0$  và đạt giá trị bé nhất ở  $\alpha = 0^0, 90^0, 180^0$ .

#### 2.4.2. Ảnh hưởng của định hướng vật liệu đến lực dọc tới hạn

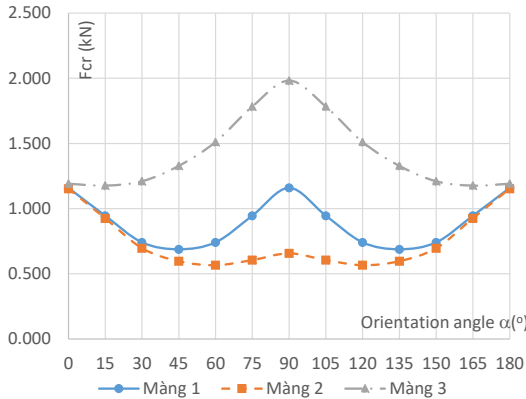
Định hướng vật liệu ảnh hưởng trực tiếp đến sự thay đổi kích thước hình học ( $r, \ell$ ) của cột ở trạng thái thổi phồng. Do đó, ảnh hưởng đến đặc trưng hình học của tiết diện ngang ( $I_0, S_0$ ), độ cứng chống uốn của tiết diện

$E_x I_0 + P \frac{I_0}{S_0}$  và độ cứng chống cắt của tiết diện  $P + kG_{\theta x} S_0$ .

Biểu đồ quan hệ giữa lực tới hạn  $F_{cr}$  và  $\alpha$  (Hình 6) có hình dạng tương đồng và có độ dốc nhỏ hơn so với biểu đồ quan hệ giữa  $E_x H$  và  $\alpha$  (Hình 4). Do đó, có thể nói mô đun  $E_x H$  có ảnh hưởng mang tính quyết định đến biến thiên của  $F_{cr}$ ; Ảnh hưởng của mô đun chống cắt  $G_{\theta x} H$  và của đặc trưng hình học của tiết diện ngang ( $I_0, S_0$ ) đến  $F_{cr}$  là không lớn.

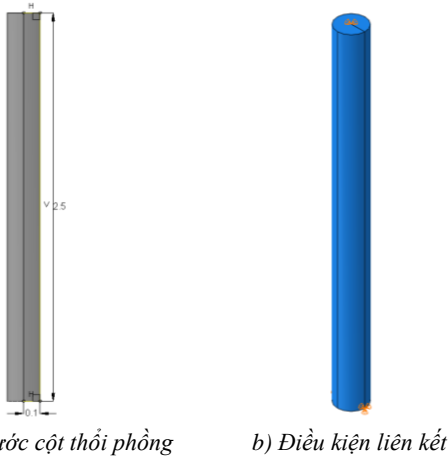
Đối với vật liệu cân bằng, lực tới hạn  $F_{cr}$  sẽ đạt giá trị lớn nhất khi trục vật liệu trùng với trục cột và sẽ đạt giá trị bé nhất khi góc định hướng  $\alpha = 45^\circ, 135^\circ$ .

Đối với vật liệu không cân bằng, lực tới hạn  $F_{cr}$  sẽ đạt giá trị lớn nhất khi trục khô của vật liệu trùng với trục cột  $\alpha = 0^\circ$  và  $\alpha = 90^\circ$  tương ứng với trường hợp Màng 2 và Màng 3. Giá trị bé nhất của lực tới hạn  $F_{cr}$  ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố hơn và nó sẽ xuất hiện khi  $\alpha = 60^\circ$  đối với Màng 2 và  $\alpha = 15^\circ$  đối với Màng 3.



Hình 6.  $F_{cr}$  vs  $\alpha$

3. Kiểm chứng bằng mô hình phần tử hữu hạn

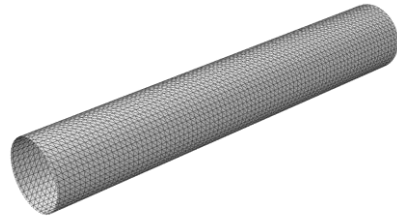


Hình 7. Khởi tạo mô hình cột màng mỏng

Mô hình phần tử hữu hạn của cột màng mỏng thối phồng chịu nén dọc trục được thực hiện với Abaqus/Explicit 2016. Mô hình được khởi tạo dưới dạng vỏ trụ tròn xoay có bán kính  $R=0,1m$  và chiều dài  $L=2,5m$ .

Đặc tính vật liệu được khai báo là Elastic, dạng Lamina. Định hướng vật liệu được thực hiện bởi chức năng Composite Layup.

Cột được mô phỏng bằng 14032 phần tử màng tam giác tuyến tính S3, khoảng cách của hệ lưới là 0,015m.



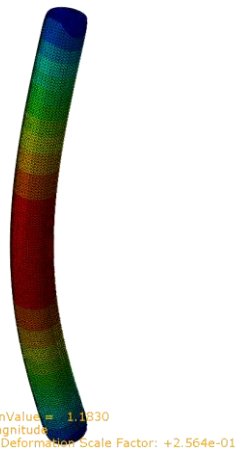
Hình 8. Lưới phần tử hữu hạn của cột màng mỏng

Bài toán được thực hiện theo hai bước:

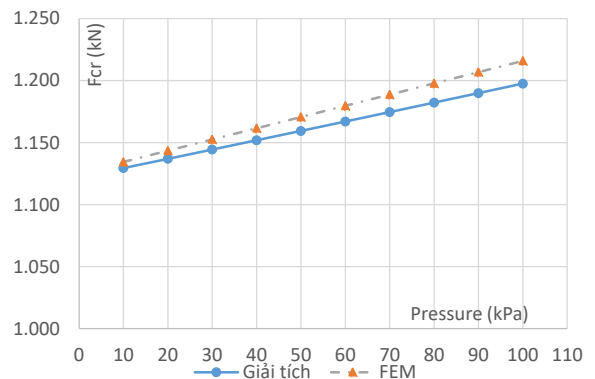
Giai đoạn thối phồng được thực hiện với phương pháp phân tích tĩnh học tổng quát (Static, General);

Giai đoạn nén dọc trục để tìm ra lực tới hạn được thực hiện với phương pháp phân tích nhiễu loạn tuyến tính (Linear perturbation).

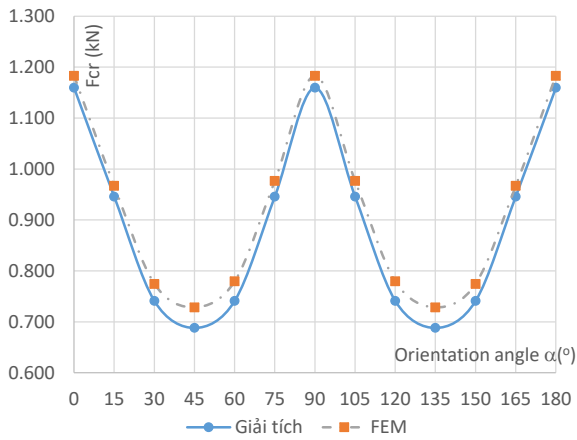
Trong mục này, các kết quả tính toán giải tích sẽ được so sánh với kết quả thu được bằng phương pháp phần tử hữu hạn để kiểm chứng sự đúng đắn của mô hình lý thuyết. Các phép tính toán được thực hiện với Màng 1, áp suất thối phồng  $p$  thay đổi từ 0 đến 100kPa với số gia 10kPa. Các kết quả so sánh được thể hiện trong Hình 10 và Hình 11.



Hình 9. Lực tới hạn  $F_{cr} = 1.183kN$  khi  $\alpha = 0^\circ$ ,  $p = 50 kPa$



Hình 10. Lực tới hạn  $F_{cr}$  vs áp suất  $p$  khi  $\alpha = 0^\circ$



**Hình 11.** Lực tới hạn  $F_{cr}$  vs góc định hướng  $\alpha$  khi  $p = 50 \text{ kPa}$

Từ kết quả trên, nhận thấy chênh lệch kết quả giữa phương pháp tính toán bằng mô hình phần tử hữu hạn so với phương pháp giải tích là không lớn, lý thuyết tính toán lực tới hạn cho cột màng mỏng thổi phồng trực giao chịu nén đúng tâm là khá chính xác và có thể áp dụng để phân tích ứng xử của cột.

#### 4. Các kết luận

Bài toán mất ổn định của cột màng mỏng thổi phồng trực giao chịu nén đã được nghiên cứu. Một số kết quả đã thu được như sau:

Ứng xử của vật liệu ở trạng thái thổi phồng đã được xây dựng, phụ thuộc vào định hướng vật liệu và trạng thái thổi phồng của kết cấu.

Lực tới hạn của cột màng mỏng thổi phồng chịu nén phụ thuộc rất lớn vào định hướng vật liệu và biên dạng của

kết cấu ở trạng thái thổi phồng.

Các phép mô phỏng số đã được thực hiện với nhiều giá trị mô đun vật liệu, áp suất thổi phồng và định hướng vật liệu khác nhau. Kết quả thu được là tương đối chính xác so với mô hình kiểm chứng.

Các nghiên cứu thực nghiệm sẽ được tiến hành để tìm hiểu ứng xử thực tế của cột màng mỏng thổi phồng trực giao chịu nén.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Thomas JC, Le van A, "An exact solution for inflated orthotropic membrane tubes", *Thin-Walled Structures*, (67), 2013, 116-120.
- [2] Nguyen QT, Thomas JC, Le van A, "An analytical solution for an inflated orthotropic membrane tube with an arbitrarily oriented orthotropy basis", *Engineering Structures*, (56), 2013, 1080-1091.
- [3] Nguyen QT, Le KT, "Xác định hệ số đàn hồi của vải kỹ thuật từ thí nghiệm thổi phồng ống màng mỏng", *Tạp chí Xây dựng*, (12), 2015, 91-94.
- [4] Comer RL, Levy S, "Deflections of an inflated circular cylindrical cantilever beam", *AIAA Journal*, 1(7), 1963, 1652-1655.
- [5] Fichter WB, *A theory for inflated thin-wall cylindrical beams*, NASA TND, 1966.
- [6] Le van A, Wielgosz C, "Bending and buckling of inflatable beams: some new theoretical results", *Thin-Walled Structures*, (43), 2005, 1166-1187.
- [7] Nguyen QT, Thomas JC, Le van A, "Inflation and bending of an orthotropic inflatable beam", *Thin-Walled Structures*, (88), 2015, 129-144.
- [8] Apedo KL, Ronel S, Jacquelin E, Massenzio M, Bennani A, "Theoretical analysis of inflatable beams made from orthotropic fabric", *Thin-Walled Structures*, (47), 2009, 1507-1522.
- [9] Nguyen TT, Ronel S, Massenzio M, Apedo KL, Jacquelin E, "Analytical buckling analysis of an inflatable beam made of orthotropic technical textiles", *Thin-Walled Structures*, (51), 2012, 186-200.